Daftar isi

Prakata

Standar Nasional Indonesia (SNI) ini merupakan revisi dari SNI 04-3851.2-1995 mengenai Sistem Konversi Angin Bagian 2: Pedoman pendekatan pengukuran kecepatan dan arah angin, perhitungan dasar untuk daya dan energi angin dan turbin angin menjadi Sistem konversi energi angin Bagian 2: Pedoman pengukuran kecepatan dan arah angin untuk perhitungan dasar daya, energi angin dan turbin angin, untuk mengikuti perkembangan teknologi alat ukur potensi energi angin dan sistem komunikasi data monitoring. SNI ini dimaksudkan sebagai panduan umum dalam menentukan potensi energi angin di lokasi dalam rangka pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Standar ini memuat pedoman, panduan, dan petunjuk teknis penentuan potensi energi angin di lokasi, dengan harapan dapat memberikan manfaat bagi kalangan profesional, praktisi, akademisi, pemerintah dan masyarakat.

SNI ini disusun oleh Komite Teknis 27-03 Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan melalui prosedur perumusan standar dan dibahas dalam rapat konsensus pada tanggal 18 Oktober 2017 di Bekasi dan dihadiri oleh wakil-wakil dari pemerintah, produsen, konsumen, lembaga penelitian dan instansi terkait lainnya.

Standar ini telah melalui tahap jajak pendapat pada tanggal 29 Januari 2018 sampai dengan 30 Maret 2018 dengan hasil akhir disetujui menjadi SNI.

Perlu diperhatikan bahwa kemungkinan beberapa unsur dari dokumen standar ini dapat berupa hak paten. Badan Standardisasi Nasional tidak bertanggung jawab untuk pengidentifikasian salah satu atau seluruh hak paten yang ada.

Untuk menghindari kesalahan dalam penggunaan dokumen dimaksud, disarankan bagi pengguna standar untuk menggunakan dokumen SNI yang dicetak dengan tinta berwarna.

Sistem konversi energi angin
Bagian 2: Pedoman pengukuran kecepatan dan arah angin untuk perhitungan dasar daya, energi angin dan turbin angin

1 Ruang lingkup

Untuk mengidentifikasi potensi energi angin di suatu lokasi/wilayah dalam rangka pemasangan satu atau lebih turbin angin sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), persyaratan utama yang harus dipenuhi adalah tersedianya potensi angin yang mencukupi di lokasi tersebut dan juga pemakaian yang sesuai berdasarkan analisis penggunaan energi. Potensi angin di lokasi ditaksir berdasarkan pengukuran dan monitoring data angin (kecepatan dan arah angin) dengan menggunakan metode yang telah ditetapkan mencakup penggunan peralatan ukur dan monitoring yang sesuai, cara pengukuran, lama pengukuran dan dengan penaksiran yang diperoleh berdasarkan pengukuran tersebut akan memberikan hasil yang lebih akurat.

Dokumen ini disusun dengan ruang lingkup sebagai berikut:

- Penaksiran data angin (kecepatan dan arah angin);
- Penaksiran rapat daya angin (*WPD – Wind Power Density*) dalam W/m^2;
- Penaksiran massa jenis udara, dalam kg/m^3;
- Penaksiran daya angin, dalam W;
- Penaksiran energi angin dalam 1 tahun (kWh/tahun atau AED - *Annual Energy Density*);
- Penaksiran energi yang dihasilkan oleh turbin angin, dalam kWh (*AEP - Annual Energy Production)*

Dokumen ini tidak dimaksudkan sebagai manual rancangan untuk turbin angin, akan tetapi dimaksudkan untuk menginformasikan pemasok dan pengguna tentang metode penaksiran energi di suatu lokasi.

2 Istilah dan definisi

2.1
data angin
data kecepatan dan arah angin yang diperoleh berdasarkan pengukuran atau monitoring di lokasi maupun berupa data sekunder yang diperoleh dari pengukuran dan pengolahan yang dilakukan oleh pihak lain yang telah disajikan dalam bentuk data tercetak maupun dalam bentuk *softcopy*. Data terdiri dari data primer dan sekunder

2.2
data angin primer
data kecepatan dan arah angin yang diperoleh berdasarkan pengukuran langsung di suatu lokasi

2.3
data angin sekunder
data angin yang diturunkan dari data primer, misalnya data statistik, daya, dan energi

2.4
anemometer
alat untuk mengukur kecepatan angin sesaat berdasarkan pengubahan kecepatan angin menjadi sinyal listrik dalam bentuk arus listrik, terdiri atas sensor kecepatan angin umumnya

berupa 3 mangkuk yang memutar poros sebuah dinamo sehingga membangkitkan arus listrik (mA) yang sebanding dengan kecepatan angin yang diukur

2.5
sensor arah angin
sensor arah yang terdiri atas daun ekor dan penggerak untuk mengubah tahanan listrik sebuah potensiometer (dalam ohm) sehingga perubahan arah sebanding dengan perubahan tahanan potensiometer tersebut, selanjutnya dengan memberikan eksitasi listrik, perubahan tahanan tersebut akan menghasilkan perubahan tegangan listrik yang sebanding dengan perubahan arah angin

2.6
perekam data (*datalogger*)
peralatan yang terdiri dari unit pengolah data elektronik (komputer) dan penyimpan data yang berfungsi untuk menerima data setiap saat serta menyimpan dan mengolah data yang masuk kedalamnya; data yang masuk adalah dari berbagai sensor/transduser melalui kanal-kanal yang tersedia pada perekam data tersebut, misalnya sensor kecepatan angin, sensor arah angin, sensor temperatur, sensor tekanan udara, dan sensor kelembaban udara

2.7
kecepatan angin
kecepatan angin (dalam m/s) sebagai hasil pengukuran maupun pengolahan, misalnya kecepatan angin sesaat, rata-rata, setiap jam, harian, bulanan maupun dalam 1 tahun

2.8
kecepatan angin lull
kecepatan angin yang lebih rendah dari kecepatan angin *cut-in* sebuah turbin angin sehingga tidak mampu untuk menggerakkan turbin angin tersebut

2.9
kecepatan angin rata-rata tiap jam (*diurnal*)
kecepatan angin rata-rata setiap jam (*diurnal*) yang dirata-ratakan berdasarkan beberapa pengukuran setiap waktu pencuplikan tertentu (umumnya setiap 10 menit)

2.10
kecepatan angin harian
kecepatan angin rata-rata dalam 1 hari sebagai hasil dari rata-rata kecepatan angin setiap jam dalam 1 hari (rata rata 24 jam)

2.11
kecepatan angin bulanan
kecepatan angin rata-rata dalam 1 bulan sebagai hasil dari rata-rata kecepatan angin setiap hari dalam 1 bulan (rata-rata 30 atau 31 hari)

2.12
kecepatan angin tahunan
kecepatan angin rata-rata dalam 1 tahun sebagai hasil dari rata-rata kecepatan angin setiap bulan (rata rata 12 bulan)

2.13
data topografi
data kontur permukaan dataran yang terdiri dari kekasaran permukaan (roughness), orografi dan shelter

2.14
kekasaran permukaan
efek bersama dari permukaan dataran dan rintangan yang menyebabkan penurunan kecepatan angin dekat permukaan tanah; contoh elemen kekasaran adalah tanaman dan bangunan, sedangkan bukit memanjang yang rata bukan elemen kekasaran karena tidak mengakibatkan kenaikan turbulensi aliran

2.15
orografi
elemen topografi yang menghasilkan pengaruh tambahan terhadap kecepatan angin yakni bertambah cepat di dekat atau di puncak dan berkurang dekat lereng dan lembah, sebagai contoh bukit *(hill)*, bukit terjal *(cliff)*, dan punggung bukit (*ridge)*

2.16
shelter
rintangan yang berdekatan (misalnya dengan sebuah bangunan) sehingga kondisi angin secara kuat akan dipengaruhi oleh rintangan tersebut dan efeknya secara vertikal akan meluas sampai sekitar 3 kali tinggi rintangan dan ke arah bawah hingga 30-40 kali tinggi rintangan tersebut.

2.17
geser angin *(wind shear)*
variasi kecepatan angin terhadap bidang yang tegak lurus pada arah angin

2.18
arah angin dominan
arah angin yang paling banyak terjadi dalam kurun waktu tertentu

2.19
wind rose
diagram distribusi arah angin yang dinyatakan dalam sektor arah (8 atau 12 sektor), dalam persentase

2.20
profil angin
persamaan geser angin yang menyatakan variasi kecepatan angin sebagai fungsi ketinggian dari permukaan tanah

2.21
distribusi Rayleigh
fungsi distribusi kemungkinan yang sering digunakan untuk penaksiran kecepatan angin yang bergantung pada satu parameter yang dapat diatur yaitu paramater skala (yang mengontrol kecepatan angin rata-rata)

2.22
distribusi Weibull
fungsi distribusi kemungkinan kecepatan angin yang bergantung pada dua parameter yaitu parameter bentuk untuk mengontrol lebar distribusi dan parameter skala untuk mengontrol rata-rata kecepatan angin

2.23
angin hilir (*up wind*)
angin yang datang dari arah depan rotor turbin angin

2.24
angin hulu (*down wind*)
angin yang datang dari arah belakang turbin angin

2.25
kecepatan angin ekstrem
rata-rata kecepatan angin tertinggi dalam durasi waktu t sekon dengan kemungkinan terjadi dalam periode waktu (berulang) yang ditetapkan dalam T tahun

2.26
faktor kapasitas *(CF-capacity factor)*
perbandingan antara daya/energi yang dihasilkan oleh turbin angin pada kecepatan angin rata-rata di lokasi dengan daya/energi turbin angin pada kecepatan nominalnya, umumnya ditentukan dalam waktu satu tahun

2.27
kurva daya turbin angin
kurva yang menyatakan hubungan antara daya turbin angin dan kecepatan angin setiap saat dengan kecepatan operasional turbin angin yang dinyatakan oleh kecepatan *start, cut in, rated, cut out* dan maksimum.

2.28
kecepatan *start*
rata-rata kecepatan angin terendah pada ketinggian naf agar dapat menggerakkan atau memutar rotor turbin angin

2.29
kecepatan *cut-in*
rata rata kecepatan angin terendah pada ketinggian naf agar turbin angin menghasilkan daya listrik

2.30
kecepatan angin *rated*
kecepatan angin yang dibutuhkan agar turbin angin menghasilkan daya nominalnya

2.31
kecepatan angin *cut-out*
rata-rata kecepatan angin tertinggi pada ketinggian naf agar turbin angin tetap menghasilkan daya listrik

2.32
kecepatan angin *survival*
kecepatan maksimum yang diperbolehkan agar turbin angin tidak mengalami kerusakan, misalnya struktur menara, rotor

3 Simbol/notasi, satuan dan singkatan

3.1 Simbol dan satuan

Simbol	Parameter	Satuan
V	kecepatan angin	[m/s]
α	eksponen kekasaran permukaan	[tanpa dimensi]
z	tinggi kekasaran permukaan	[m]
z_0	tinggi kekasaran permukaan referensi	[m]
P	daya	[W, kW]
E	energi	[kWh]
t	waktu	[sekon]
p	tekanan atmosfer	[atm]
Z	tinggi rintangan	[m]
WPD	*Wind Power Density*	[W/m^2]
ρ	massa jenis udara	[kg/m^3]
B	tekanan udara atmosfer	[Pa]
T	temperatur absolut	[K]
P_W	tekanan uap	[Pa]
Po	tekanan udara luar	[mB atau mmHg]
Pr	tekanan udara luar	[mmHg]
Vp	tekanan uap air	[mmHg]
AED	*Annual Energy Density*	[kWh/m^2]
k_E	faktor pola energi	[tanpa dimensi]

3.2 Singkatan

AED	*Annual Energy Density*
AEP	*Annual Energy Production*
WMO	*World Metrology Organisation*
WPD	*Power Density*

4 Pengukuran data angin

4.1 Tujuan pengukuran

Tujuan pengukuran data angin adalah untuk medapatkan data dan informasi yang aktual tentang kecepatan dan arah angin untuk penaksiran potensi energi angin di lokasi pengukuran.

4.2 Durasi pengukuran

Data angin dalam perekam data dicuplik setiap 10 menit sehingga diperoleh nilai kecepatan angin rata-rata harian, rata-rata bulanan dan rata-rata tahunan. Nilai rata-rata kecepatan angin ini dijadikan sebagai data masukan dalam proses perhitungan potensi energi angin.

Untuk turbin angin skala kecil, pengukuran dan monitoring data angin di suatu lokasi minimal dalam 1 (satu) tahun, sedangkan untuk skala menengah dan besar diperlukan periode atau waktu data pengukuran di atas 1 (satu) tahun.

4.3 Hasil yang diinginkan

Data dan informasi yang diperlukan dari pengukuran data angin di lokasi adalah:

- kecepatan dan arah angin setiap saat yang dicuplik dalam 10 menit
- data statistik misalnya: nilai rata-rata, minimum dan maksimum, lull, data angin setiap jam, setiap hari maupun setiap bulan
- distribusi kecepatan (distribusi Weibull) dan distribusi arah angin (*wind rose*)
- temperatur dan tekanan atmosfer bila memasang sensor temperatur dan tekanan
- rapat daya angin (WPD - *wind power density*), dalam W/m^2
- energi angin yang dihasilkan dalam 1 tahun, dalam kWh/tahun

4.4 Peralatan pengukur data angin

4.4.1 Jenis peralatan

Pengukuran data angin dimaksudkan untuk mengukur kecepatan dan arah angin di lokasi. Peralatan ukur data angin umumnya dioperasikan minimal dalam jangka waktu 1 (satu) tahun untuk PLTB skala kecil dan lebih dari 1 (satu) tahun untuk PLTB skala menengah dan besar. Peralatan ukur terdiri dari anemometer, sensor arah angin (*wind vane*) dan perekam data yang dipasang pada menara. Menara berfungsi sebagai tempat dudukan anemometer, sensor arah angin dan perekam data. Untuk ekstrapolasi, beberapa anemometer dapat dipasang di menara pada ketinggian 20 m, 35 m, dan 50 m, sensor arah angin dipasang pada ketinggian anemometer tertinggi sedangkan perekam data dipasang pada ketinggian 5 m.

Peralatan ukur yang digunakan terdiri dari:

a. Anemometer: adalah alat standar untuk mengukur kecepatan angin setiap saat. Anemometer menjamin akurasi pengukuranan sampai 0,3 m/s sampai 0,5 m/s (atau 3 % sampai 5 % untuk kecepatan di atas 15 m/s) dan harus dikalibrasi sesuai dengan standar nasional (SNI) maupun internasional dengan sertifikat ISO 3966.
   Anemometer terdiri atas 3 tipe yaitu:
   i. Tipe mangkuk (3 mangkuk);
   ii. Perubahan sifat reflektif cahaya;
   iii. Gelombang suara karena gerakan udara
b. Sensor arah angi*n (wind vane*) untuk pengukuran arah angin setiap saat pada ketinggian sekitar 1,5 m dibawah anemometer tertinggi pada menara agar tidak mempengaruhi besarnya kecepatan angin yang diukur oleh anemometer teratas. Sinyal keluaran harus mencakup 360 derajat penuh tanpa celah. Sensor arah angin mengukur arah angin bersamaan dengan pengukuran kecepatan angin oleh anemometer.
c. *Perekam data* digunakan untuk mengumpulkan data, menyimpan dan mengolah data tersebut menjadi informasi yang dibutuhkan, antara lain kecepatan angin, arah angin, tekanan udara, temperatur dan kelembaban udara, yang dikumpulkan dan dikontrol secara akusisi data dengan menggunakan sistem SCADA (*System Control and Data Acquisition*).
d. Sensor tekanan udara luar (tekanan barometrik), untuk mengukur tekanan atmosfer di lokasi. Sensor ini mengubah tekanan atmosfer menjadi besaran listrik yang sebanding dengan tekanan. Sensor ini dapat dipasang pada setiap ketinggian yang menyenyangkan.
e. Sensor temperatur, untuk mengukur temperatur udara luar dalam derajat celsius dengan mengubah besaran temperatur menjadi listrik yang sebanding. Dipasang minimal 10 m diatas permukaan tanah untuk menghindari efek radiasi matahari dari permukaan tanah dan juga untuk melindungi probe sensor tersebut.
f. Sensor kelembaban udara. Tidak berpengaruh terhadap keluaran energi tetapi bermanfaat untuk mengestimasi bahaya es.
g. Teknologi LIDAR (*Light Detection and Ranging*) adalah sistem laser untuk mengukur profil angin dari ketinggian 10 m hingga 200 m.
h. Teknologi SODAR (*Sonic Detection and Ranging*) adalah alat untuk mengukur kecepatan dan arah angin menggunakan gelombang suara, alat ini dapat mengukur sampai dengan 800 m di atas permukaan tanah dengan interval per 30 menit.

i. GPS (*Global Positioning System*), untuk menentukan posisi geografis lokasi (ketinggian di atas permukaan laut, lintang dan bujur).
j. Modem untuk sistem komunikasi data *online*.

Butir d, e, f, g, h, i, dan j adalah opsional (pilihan).

Contoh peralatan alat ukur dan spesifikasi teknis dapat dilihat pada Lampiran A.

4.4.2 Persyaratan peralatan alat ukur data angin

Persyaratan peralatan alat ukur data angin yang digunakan adalah agar dapat memonitor pola/karakter data kecepatan angin dan data arah angin di lokasi secara kontinu. Selanjutnya data kecepatan angin dan data arah angin tersebut diolah dan disimpan dalam perekam data untuk pengolahan lanjut.

Pemilihan sebuah alat ukur dinyatakan dengan spesifikasi teknik dengan parameter utama sebagai berikut:

- Tipe,
- Julat,
- Ketelitian,
- Resolusi,
- Temperatur operasi
- Kelembaban,
- Tekanan udara, dll

4.5 Metode pendekatan

4.5.1 Metode tidak langsung

Metode penaksiran secara tidak langsung dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain dengan mengamati fenomena alam, misalnya kondisi tanaman, pohon dan lingkungan, dan teknik pemodelan *(computer modelling)* dengan menggunakan data satelit. Salah satu pendekatan untuk penaksiran kecepatan angin adalah dengan pengamatan fenomena alam yang dikelompokkan dengan menggunakan Skala *Beaufort* yang diperlihatkan pada Lampiran C. Contoh data satelit yang menunjukkan julat kecepatan angin diperlihatkan pada Lampiran D.

4.5.2 Metode langsung

Metode langsung adalah melakukan pengukuran kecepatan angin dengan menggunakan anemometer, arah angin dengan sensor arah angin dan perekam data untuk akuisisi data yang secara bersama sama dipasang pada sebuah menara pada ketinggian yang telah ditetapkan, misalnya anemometer pada ketinggian 10 m (standar WMO), 25 m, 50 m atau lainnya. Monitoring data angin adalah bila pengukuran dilakukan secara kontinu untuk suatu periode tertentu, misalnya dalam 1 tahun. Data yang diperoleh adalah kecepatan dan arah angin sesaat yang dicuplik setiap 10 menit dan selanjutnya dapat digunakan untuk memperoleh data dan informasi bermanfaat, antara lain:

- kecepatan angin aktual
- kecepatan angin minimum dan maksimum,
- kecepatan angin ekstrem,
- kecepatan angin lull,
- kecepatan angin rata rata,
- distribusi frekuensi

5 Penaksiran potensi angin di lokasi

5.1 Kecepatan angin rata-rata

Kecepatan angin rata-rata adalah jumlah kecepatan angin dalam beberapa pengukuran dibagi dengan banyaknya pengukuran, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{rata-rata} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i}{n} \quad (1)$$

Keterangan:

$V_{rata-rata}$ adalah kecepatan angin rata-rata (m/s)

V_i adalah kecepatan angin ke i;

n adalah jumlah data; i = 1,2,3 . . .n

dengan menggunakan rumus ini, maka kecepatan angin rata rata harian, bulanan dan tahunan dapat ditentukan.

5.2 Ekstrapolasi

Metode ekstrapolasi adalah cara menaksir kecepatan angin di suatu lokasi dengan memperbandingkan terhadap kecepatan angin referensi yang telah diketahui berdasarkan pengukuran.

Secara ideal untuk mendapatkan data angin yang aktual, pengukuran kecepatan dan arah angin harus dilakukan di lokasi pada suatu ketinggian tertentu yang sama dengan tinggi menara turbin angin yang direncanakan yang dapat mencapai 100 m atau lebih; sehingga secara ideal, anemometer dan sensor arah angin harus ditempatkan pada ketinggian yang sama dengan tinggi menara turbin angin; namun dalam prakteknya hal ini sulit dilakukan karena penempatan anemometer dan sensor arah pada menara yang sangat tinggi tersebut sulit dilakukan, karena menyangkut cara pemasangan, pemeliharaan dan pemeriksaan, ketidaklurusan menara, goyangan menara yang diakibatkan oleh dorongan angin, vibrasi menara, dan lain-lain.

Dengan metode ekstrapolasi (geser angin – *wind shear*), penaksiran kecepatan angin pada suatu ketinggian yang lebih tinggi dengan mengacu pada pengukuran referensi dapat dilakukan sebagai berikut:

$$\frac{V}{V_r} = \left(\frac{h}{h_r}\right)^{\alpha} \quad (2)$$

Keterangan:

V adalah kecepatan angin pada ketinggian yang di inginkan (m/s)

Vr adalah kecepatan angin pada ketinggian referensi (m/s)

h adalah ketinggian yang di inginkan (m)

h_r adalah ketinggian referensi (m)

α adalah faktor eksponensial lokasi yang dapat diperoleh dengan membandingkan dua pengukuran
pada menara yang sama

Sebagai contoh, dengan membandingkan data kecepatan angin pada pengukuran 50 m dengan membandingkan terhadap kecepatan pada pengukuran 35 m, maka h = 50 m, h_r = 35 m, V adalah kecepatan angin yang dicatat pada ketinggian 50 m dan V_r pada ketinggian 35 m; maka dengan memasukkan nilai-nilai ini ke dalam persamaan (1) nilai α dapat dtentukan.

Selanjutnya untuk menaksir kecepatan angin pada ketinggian lain yang lebih besar dari 50 m rumus dalam persamaan (1) dapat digunakan dengan nilai α yang telah ditentukan tersebut.

5.3 Kekasaran permukaan

Penaksiran dengan cara ini adalah dengan identifikasi kondisi topografi atau tipe permukaan dataran yang dinyatakan oleh tinggi kekasaran yaitu untuk menaksir kecepatan angin pada suatu ketinggian dan membandingkannya terhadap kecepatan angin referensi dengan rumus,

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \frac{ln\,(^{z}/_{z_0})}{ln\,(^{z_r}/_{z_0})} \qquad (3)$$

Keterangan:

V(z) adalah kecepatan angin pada ketinggian yang akan ditentukan (m/s)
V(z_r) adalah kecepatan angin pada ketinggian referensi, misalnya 10 m (m/s)
z adalah ketinggian yang kecepatan anginnya akan ditentukan (m)
z_r adalah ketinggian referensi (m), misalnya 10 m
z_o adalah ketinggian kekasaran (m)

Pendekatan ini dikenal sebagai metode geser angin *(wind shear*) dan dapat digunakan di daerah-daerah yang tidak terdapat bukit-bukit yang tinggi atau rintangan-rintangan besar lainnya dalam batas 1-2 km.

Data kekasaran permukaan diperlihatkan pada Tabel 1:

Tabel 1 - Faktor kekasaran

Jenis Permukaan	Kondisi	z_0 (m)
- rata/datar	- pantai, es, permukaan salju, permukaan laut	0 ,005
- terbuka	- rumput rendah, lapangan terbang, tanah tanpa tanaman	0,03
	- tanaman rendah (misal padi) rintangan jarak pada 20 h	0,10
- kasar	- tanaman tinggi (misal tebu, pepohonan, rintangan pada jarak 15 h)	0,50
- sangat kasar	- hutan, kebun buah-buahan rintangan pada jarak 10 h	1,0
- tertutup	- desa, luar kota	>1,0
- pemukiman	- pusat kota, ruang terbuka dalam hutan	>2

Keterangan:

h adalah tinggi rintangan

5.4 Daya angin spesifik

Daya angin spesifik di suatu lokasi dinyatakan dalam rapat daya angin (*WPD – Wind Power density*) yaitu daya angin per satuan luas, yang ditentukan berdasarkan kecepatan angin dan massa jenis udara di lokasi, dengan rumus,

$$WPD = \frac{1}{2}\rho V^3 \qquad (4)$$

Keterangan:

WPD adalah daya angin spesifik (W/m^2)
ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3)
V adalah kecepatan angin angin rata rata di lokasi (m/s)

Untuk penaksiran rapat energi dalam 1 tahun (AED), nilai kecepatan angin (V) yang diambil adalah kecepatan angin rata-rata tahunan.

Massa jenis udara ρ dalam kg/m³, dapat diperoleh dari pengukuran di lokasi atau lebih praktis berdasarkan pengukuran temperatur udara (dalam derajat Celcius) dan tekanan barometrik, dengan rumus sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{T}\left\{\frac{B}{R_o} - \emptyset P_w\left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_w}\right)\right\} \qquad (5)$$

dan

$$P_W = 0{,}0000205\ e^{0{,}0631846T} \qquad (6)$$

Keterangan:

- B adalah tekanan udara atmosfer diukur dengan sensor tekanan (Pa)
- T adalah temperatur absolut dalam K dengan °K = 273 + °C,
- e adalah kelembaban relatif (0 sampai 100 %),
- R_0 adalah konstanta gas udara kering (287,5 J/kg K),
- R_W adalah konstanta gas uap air (461,5 J/kg K),
- P_W adalah tekanan uap yang nilainya bergantung pada temperatur udara rerata (*mean air temperatur)* (Pa)

Cara lain untuk menentukan ρ adalah dengan rumus,

$$\rho = 348{,}8\ \frac{P_o}{T} \qquad (7)$$

atau

$$\rho = 0{,}456\left(\frac{P_o^{\ *}}{T}\right) \qquad (8)$$

Keterangan:

- ρ adalah massa jenis udara (gr/cm³),
- Po adalah tekanan udara luar (atmosfer) dalam milibar mB (1000 mB),
- P_0* adalah tekanan udara luar dalam mmHg (760 mmHg)
- T adalah 273 + t, dengan t adalah temperatur (°C)

atau bila dinyatakan dalam tekanan udara luar, tekanan uap air dan temperatur adalah,

$$\rho = 1{,}2929\left(\frac{P_r - V_p}{760}\right)\left(\frac{273}{T}\right) \qquad (9)$$

Keterangan:

- ρ adalah massa jenis udara (kg/m³),
- P_r adalah tekanan udara luar (atmosfer) (mmHg),
- V_p adalah tekanan uap air, (mmHg)
- T adalah temperatur (°K)

Dalam praktik untuk estimasi, nilai ρ diambil antara 1,100 – 1,300 kg/m³ yang lebih baik adalah hasil pengukuran langsung.

5.5 Energi angin

Energi angin umumnya diestimasi untuk 1 tahun yang disebut energi angin tahunan (AED). Penaksiran energi angin dalam 1 tahun dilakukan dari hubungan antara daya dan energi, yaitu:

$$AED = (WPD) \times 8760 \times 10^{-3} \qquad (10)$$

Keterangan:
AED adalah rapat energi dalam 1 tahun (kWh/m^2)
8760 adalah jumlah jam dalam 1 tahun

Nilai WPD yang digunakan adalah dalam persamaan (4) dengan mengambil V adalah kecepatan angin rata-rata.

5.6 Penaksiran energi angin berdasarkan distribusi kecepatan angin

Untuk sekumpulan data yang diukur di lokasi akan menghasilkan distribusi kecepatan angin tertentu yang memberikan hubungan antara frekuensi kecepatan angin terhadap kecepatan angin dan selanjutnya digunakan untuk penaksiran energi yang lebih akurat di lokasi tersebut. Distribusi yang lebih banyak digunakan adalah distribusi Weibull yang karakteristiknya diberikan oleh dua parameter yaitu (1) parameter bentuk k (tanpa dimensi), dan (2) parameter skala c dengan dimensi m/s. Parameter bentuk k dapat diperoleh dari kurva distribusi Weibull yang memberikan pola energi di lokasi dan selanjutnya digunakan untuk menaksir daya angin per satuan luas .

Faktor pola energi k_E di definisikan sebagai,

$$k_E = \frac{\text{jumlah total daya yang tersedia dalam angin}}{\text{daya yang dihitung dari pangkat tiga kecepatan angin rerata}} \qquad (11)$$

atau

$$k_E = \frac{\left(\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} V_n^3\right)}{\left(\frac{i}{N}\sum_{n=1}^{N} V_n\right)^3} \qquad (12)$$

Keterangan:
k_E adalah faktor pola energi
N adalah jumlah pengukuran setiap jam selama waktu pengukuran data dilokasi (dalam tahun)
I adalah jam ke i dalam periode pengukuran
V_n adalah kecepatan angin jam ke I (m/s)

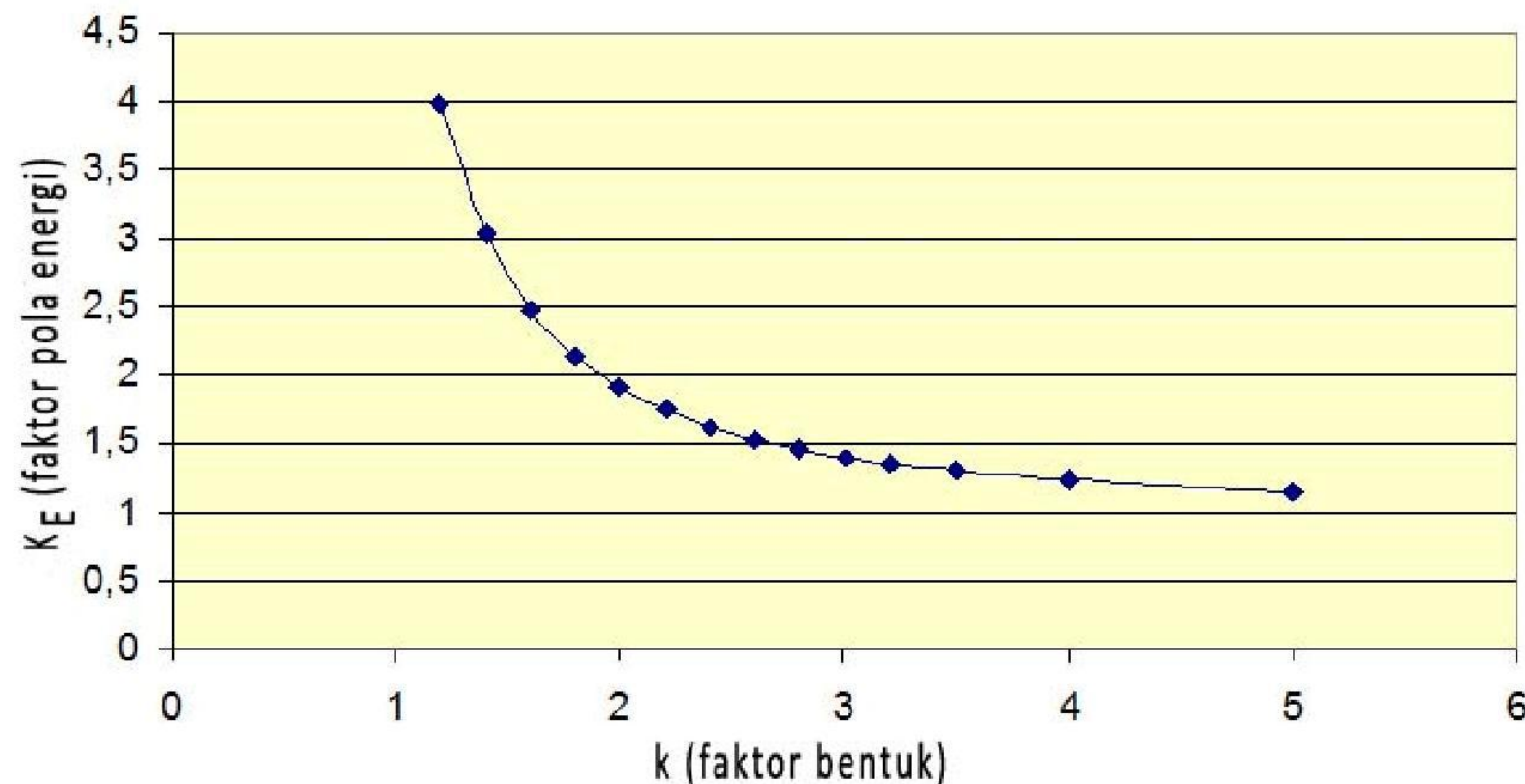
Dengan cara ini, data kecepatan angin setiap jam (diurnal) harus tersedia.

Selanjutnya dengan mengetahui nilai k_E. maka energi yang tersedia di lokasi diperoleh dengan rumus:

$$AED = k_E .\ ½\ \rho\ V^3 .8760 \qquad (13)$$

Keterangan:
AED adalah rapat energi dalam 1 tahun (kWh/m^2)

k_E adalah nilai yang diperoleh dari persamaan 11
ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3)
V adalah kecepatan angin rata rata di lokasi (m/s)
8760 adalah jumlah jam dalam 1 tahun

Secara grafis, untuk menentukan k_E adalah dengan menggunakan kurva yang memberikan hubungan antara k dan k_E pada Gambar 1 dengan nilai k yang diperoleh dari kurva distribusi Weibull (Lampiran E).

Gambar 1 - Kurva yang memberikan hubungan antara k dan k_E

Cara lain diperlihatkan pada Tabel 2 yang menjelaskan hubungan antara k dan k_E. Selanjutnya nilai k_E yang diperoleh digunakan untuk menaksir energi dengan menggunakan persamaan (13).

Tabel 2 - Hubungan antara k dan k_E

k	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	4,0	5,0
k_E	3,99	3,03	2,48	2,14	1,91	1,75	1,63	1,53	1,46	1,40	1,38	1,30	1,23	1,15

5.7 Distribusi arah angin (*wind rose*)

Tujuan pengukuran arah angin adalah untuk menentukan letak pondasi agar tidak mengalami pengaruh angin dari angin dominan yang dapat mengakibatkan kerusakan konstruksi.

Arah angin diukur dengan sensor arah angin yang dinyatakan dalam derajat dengan julat 0 – 360 derajat dan arah acuan 0 adalah Utara. Distribusi arah angin dinyatakan dalam *wind rose* dalam 8 atau 12 sektor arah angin yang akan memberikan data dan informasi mengenai:

a. Arah angin rata rata
b. Arah angin dominan

Contoh *wind rose* yang memberikan distribusi arah angin di suatu lokasi diperlihatkan pada Lampiran F.

5.8 Metode komputasi untuk penaksiran daya dan energi

Cara lain untuk estimasi daya yang dihasilkan di lokasi adalah dengan menggunakan metode komputasi berdasarkan program perangkat lunak (*software*) yang tersedia. Persamaan berikut merupakan cara untuk menghitung daya angin dalam 1 tahun.

$$P = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \times \rho \times f_i \times v_i^3 \qquad (14)$$

Keterangan:

P adalah daya angin (W/m^2)
f_i adalah frekuensi distribusi pada kelas i (%) menurut *bin* kecepatan angin
Vi adalah kecepatan angin pada kelas i (m/s)

Sehingga energi angin atau AED adalah:

$$\begin{aligned} \mathrm{AED} &= P \times \Delta t \\ &= \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \times \rho \times f_i \times v_i^3 \times 8760 \end{aligned} \qquad (15)$$

Keterangan:

AED adalah rapat energi angin dalam 1 tahun (kWh/m^2)
f_i adalah frekuensi distribusi pada kelas i (%)
vi adalah kecepatan angin pada kelas i (m/s)
Δt adalah periode data (1 tahun = 8760 jam)

5.9 Daya dan energi turbin angin

Penaksiran daya yang dihasilkan oleh sebuah turbin angin di lokasi dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut
.

$$P_{wtg} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \times C_p(\lambda) \times \rho \times A \times f_i \times v_i^3 \qquad (16)$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \qquad (17)$$

Keterangan:

P_{wtg} adalah daya output turbin angin (W)
C_p (λ) adalah koefisien daya rotor turbin angin yang nilainya bergantung λ rotor turbin angin
Λ adalah rasio kecepatan ujung rotor turbin angin (*tip speed ratio*)
ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3)
A adalah luas sapuan rotor turbin angin (m^2)
D adalah diameter rotor turbin angin (m)
f_i adalah frekuensi distribusi pada kelas i (%) menurut *bin* kecepatan angin
v_i adalah kecepatan angin pada kelas i (m/s)

Sehingga energi output turbin angin, AEP adalah:

$$AEP = P_{wtg} \times \Delta t \qquad (18)$$

Keterangan:

AEP adalah output energi turbin angin (kWh)

P_{wtg} adalah daya *output* turbin angin (W)

Δt adalah periode data (1 tahun = 8760 jam)

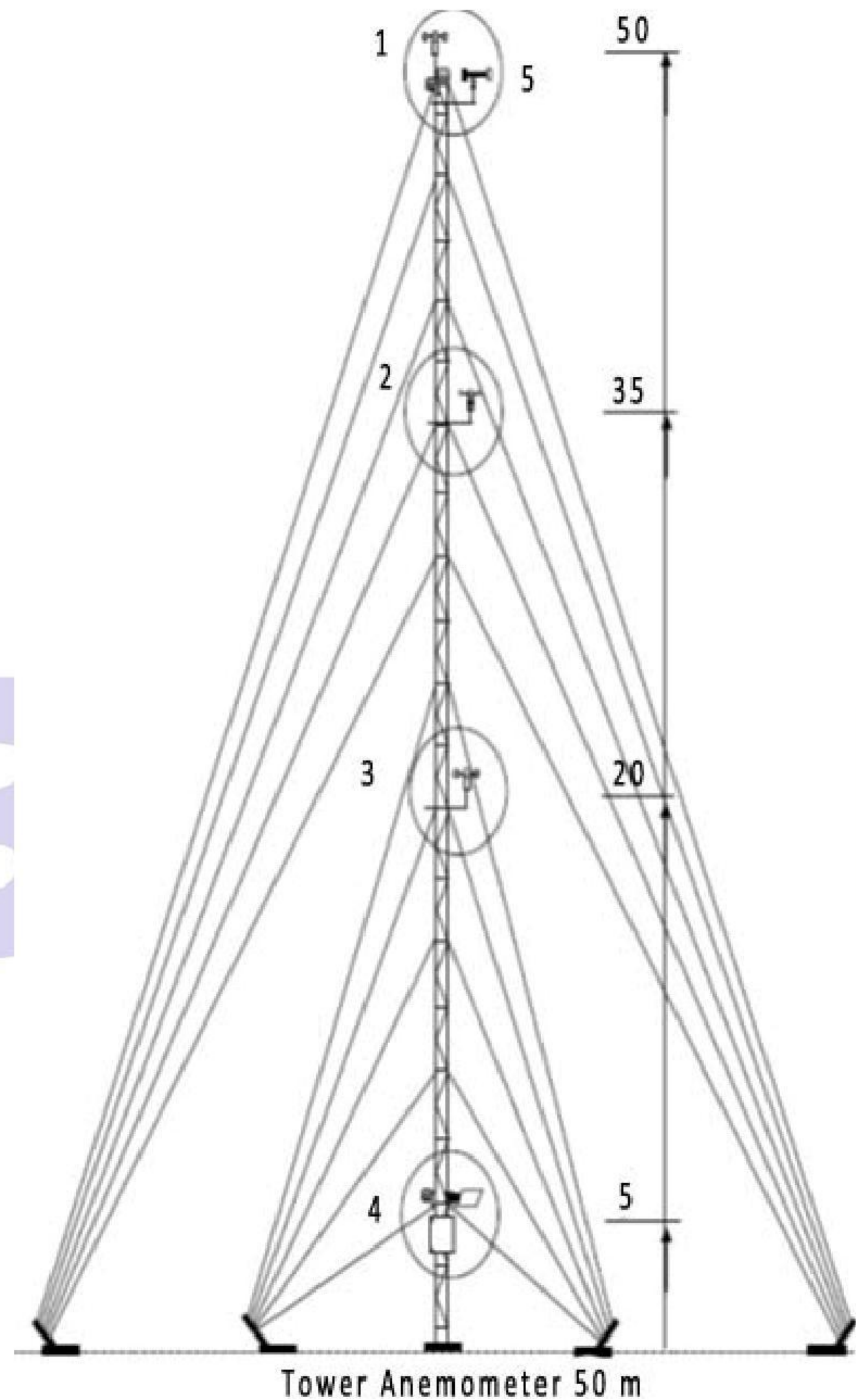
Contoh distribusi kecepatan angin yang diklasifikasi menurut *bin* (beberapa interval kecepatan angin) dengan selang 1 m/s dapat dilihat pada Lampiran G.

Lampiran A
(informatif)
Peralatan ukur data angin

Gambar A.1 - Anemometer, sensor arah angin dan perekam data

Tabel A.1 - Spesifikasi teknis peralatan ukur data angin

Parameter	Anemometer	Sensor Arah Angin
- Tipe	3 mangkuk sebagai sensor	potensiometrik
- Julat	0 – 40 m/s	0 - 360^0
- Ketelitian	0,50 %	± 10 %
- Resolusi	0,20 m/s	± 1 ^{0}
- Temperatur operasi	0 – 50^{0}C	0 – 50^{0}C
- Kelembaban	95 %	95 %
- Tekanan udara	1 atm	1 atm

Lampiran B
(informatif)
Pengukuran data angin dengan tiga anemometer, sensor data angin, dan perekam data pada menara latis 50 meter

Gambar B.1 – Contoh menara pengukuran data angin

Konfigurasi peralatan ukur potensi angin

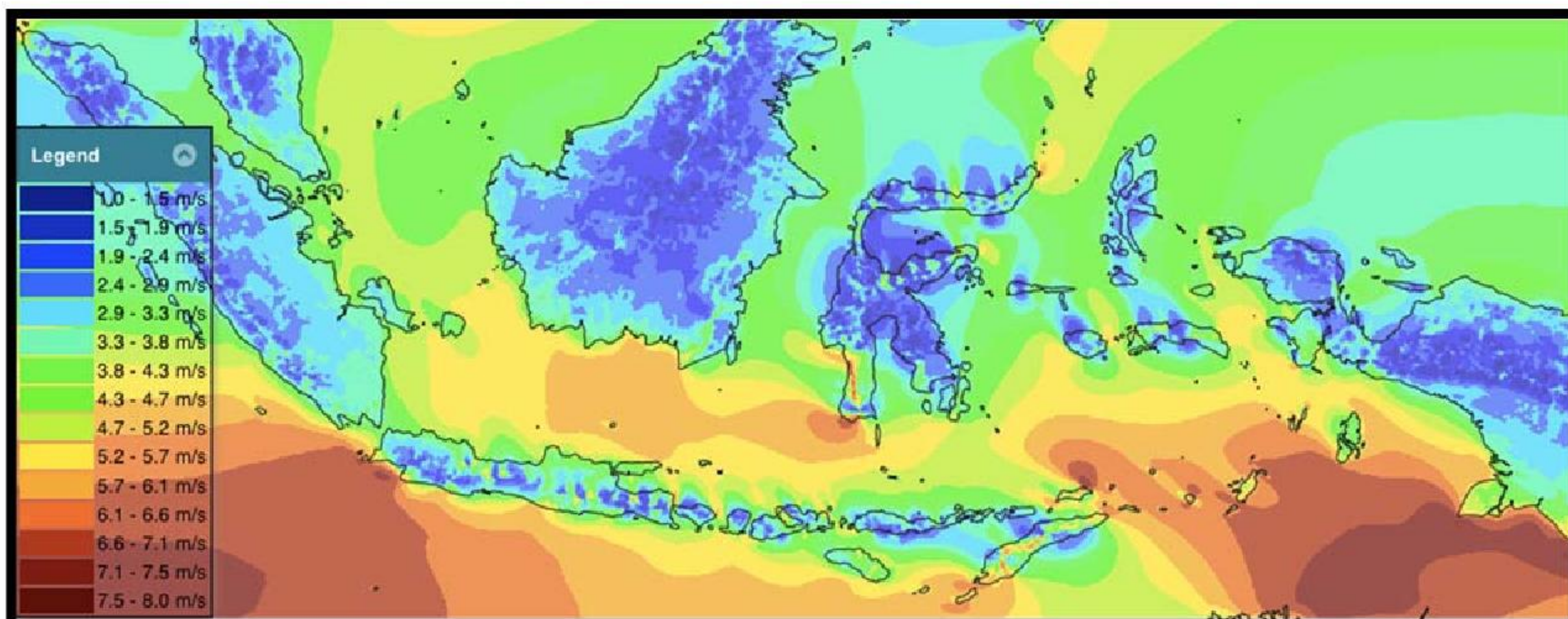
- Tinggi menara: 50 m
- Anemometer (1) pada puncak menara (ketinggian 50 m), anemometer (2) pada ketinggian 35 m dan anemometer (3) pada ketinggian 20 m
- Sensor arah angin (5) sekitar 1,5 m dibawah puncak menara 50 m
- Perekam data (4) pada ketinggian 3 m – 5 m dari permukaan tanah

Lampiran C
(informatif)
Skala *Beaufort*

Tabel C.1 – Skala Beaufort

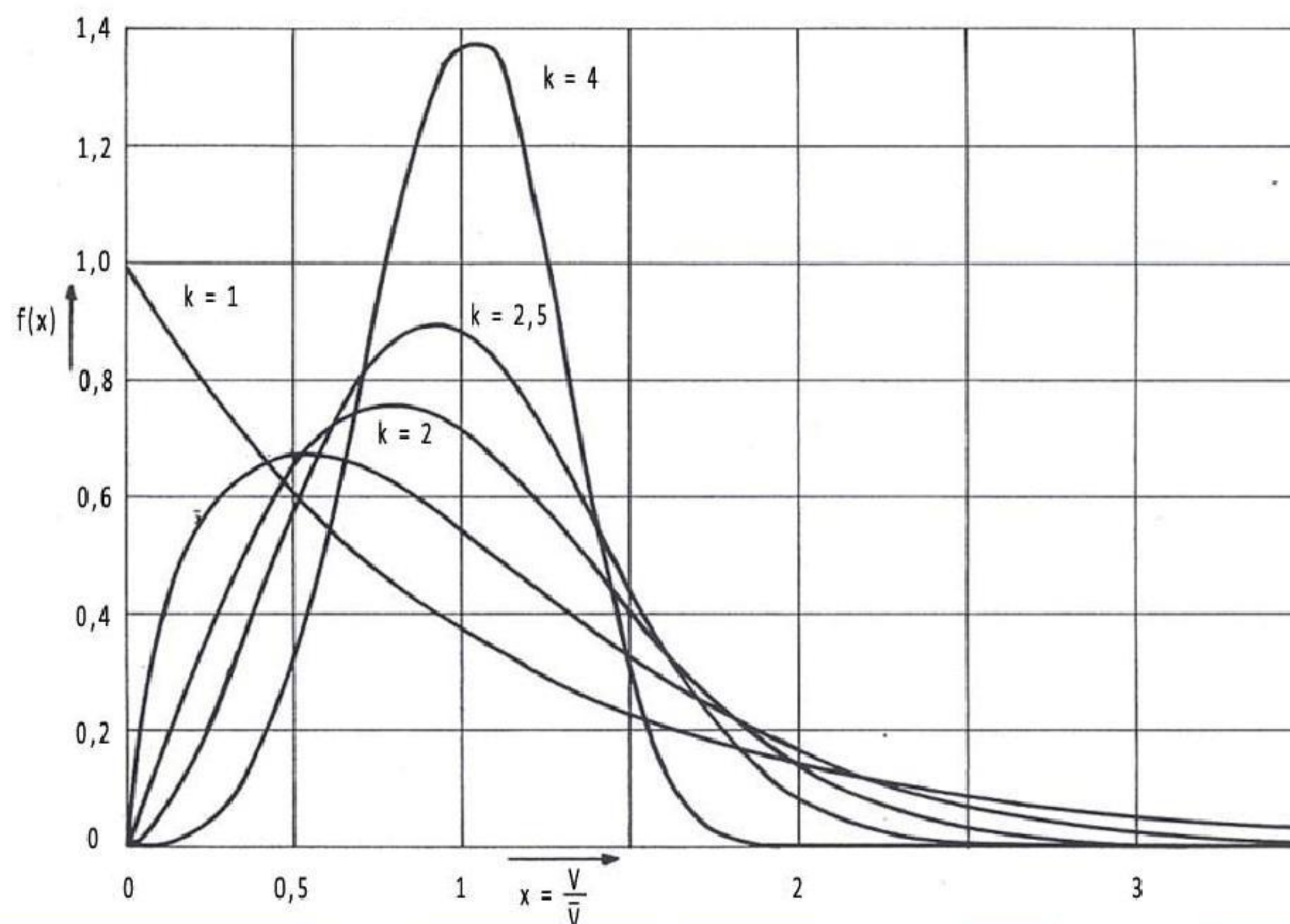
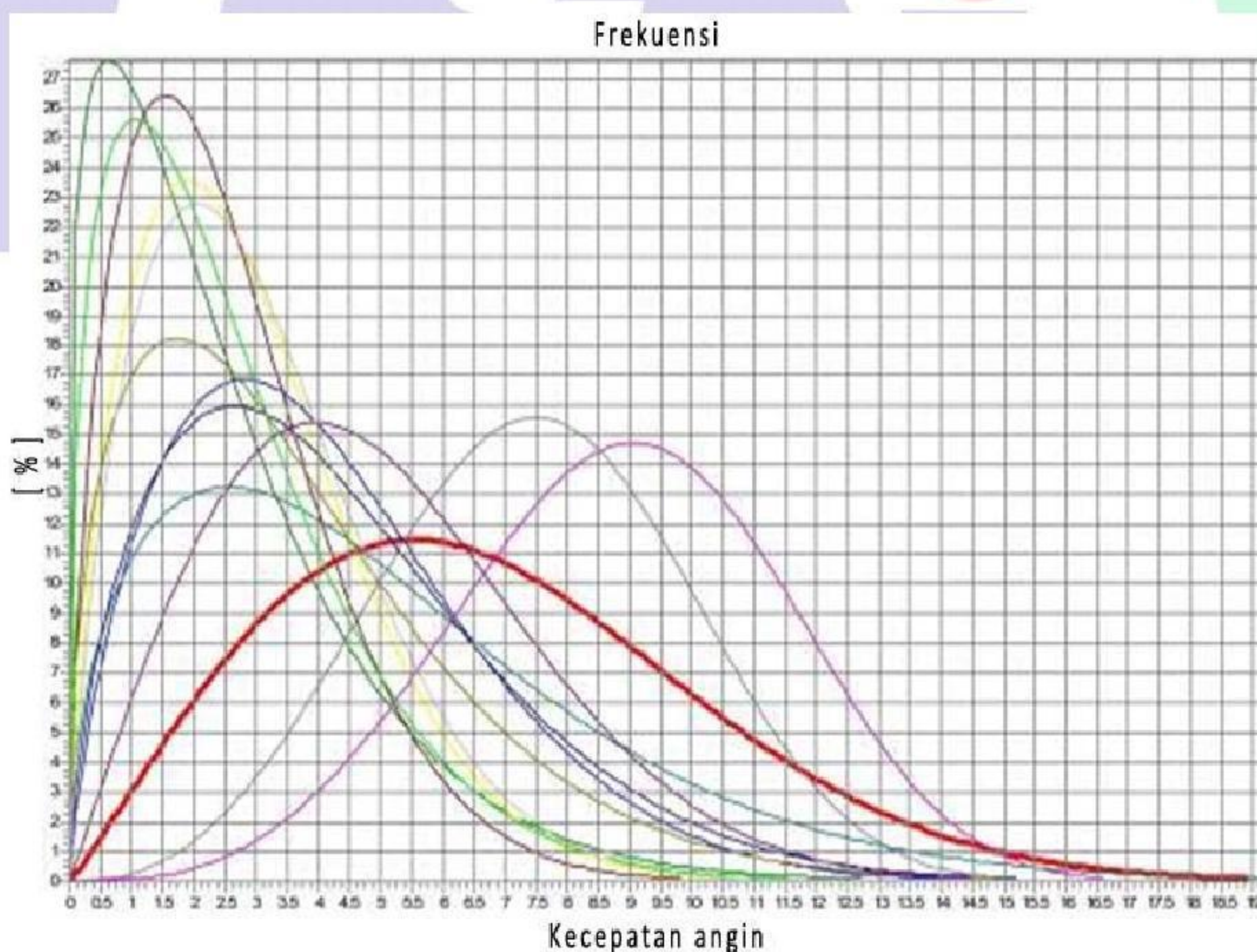
<table>
<tr><th>Skala Beaufort</th><th>knot</th><th>m/s</th><th>Kekuatan Angin</th><th>Perkiraan Kecepatan Angin, m/s</th></tr>
<tr><td>0</td><td><1</td><td>0-0.2</td><td>tenang</td><td>Angin bergerak vertikal</td></tr>
<tr><td>1</td><td>1-3</td><td>0.3-1.5</td><td>Hembusan angin lemah</td><td>Angin berhembus sepoi-sepoi; mengindikasikan arah angin; baling-baling tidak bergerak</td></tr>
<tr><td>2</td><td>4-6</td><td>1.6-3.3</td><td>Hembusan angin ringan</td><td>Angin terasa di wajah; daun-daun berdesir; baling-baling mulai bergerak</td></tr>
<tr><td>3</td><td>7-10</td><td>3.4-5.4</td><td>Hembusan angin sedang</td><td>Daun, ranting bergerak konstan; bendera berkibar</td></tr>
<tr><td>4</td><td>11-16</td><td>3.5-7.9</td><td>Hembusan angin moderat</td><td>Debu, daun, dan kertas mulai berterbangan, ranting pohon bergoyang</td></tr>
<tr><td>5</td><td>17-21</td><td>8.0-10.7</td><td>Hembusan angin mendekati kuat</td><td>Daun-daun pohon kecil bergoyang</td></tr>
<tr><td>6</td><td>22-27</td><td>10.8- 13.8</td><td>Hembusan angin kuat</td><td>Cabang pohon besar bergoyang; siulan terdengar pada kabel</td></tr>
<tr><td>7</td><td>23-33</td><td>13.9-17.1</td><td>Mendekati kencang</td><td>Pohon bergerak, orang terasa sulit berjalan melawan angin</td></tr>
<tr><td>8</td><td>34-40</td><td>17.2-20.7</td><td>Kencang</td><td>Ranting patah, orang semakin sulit bergerak maju</td></tr>
<tr><td>9</td><td>41-47</td><td>20.8-24.4</td><td>Kencang sekali</td><td>Kerusakan bangunan mulai terjadi, atap rumah lepas, cabang pohon yang lebih besar patah</td></tr>
<tr><td>10</td><td>48-55</td><td>24.5-28.4</td><td>Badai</td><td>Jarang terjadi di darat; pohon patah dan tercabut dari akarnya; terjadi kerusakan bangunan yang cukup besar</td></tr>
<tr><td>11</td><td>56-63</td><td>28.5-32.6</td><td>Badai dahsyat</td><td rowspan="7">Sangat jarang terjadi di darat; biasanya disertai dengan kerusakan yang meluas</td></tr>
<tr><td>12</td><td>64-71</td><td>32.7-36.9</td><td rowspan="6">Badai topan</td></tr>
<tr><td>13</td><td>72-80</td><td>37.0-41.4</td></tr>
<tr><td>14</td><td>81-89</td><td>41.5-46.1</td></tr>
<tr><td>15</td><td>90-99</td><td>46.2-50.9</td></tr>
<tr><td>16</td><td>100-108</td><td>51.0-56.0</td></tr>
<tr><td>17</td><td>109-118</td><td>56.1-61.2</td></tr>
</table>

(Sumber : *L.L.Freris, Wind Energy Conversion Systems*, *Prentice Hall*, NY, 1990)

Lampiran D
(informatif)
Data satelit peta kecepatan angin di Indonesia

(Sumber: DANIDA bekerjasama dengan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral)

Gambar D.1 – Peta kecepatan angin di Indonesia

Peta ini dikembangkan pada tahun 2014-2017 oleh EMD *International* A/S Denmark yang dibiayai oleh Enviromental Support Programme 3 (ESP3) DANIDA. Proyek ini diimplementasikan oleh Kementerian ESDM dan ESP3. Diaplikasikan dari skala MESO model WRF (*Weather and Research Forecast Model)* dengan resolusi sparsial $0{,}029^0$ atau 3 km dengan input data dari era *interm global* periode 2004 – 2015.

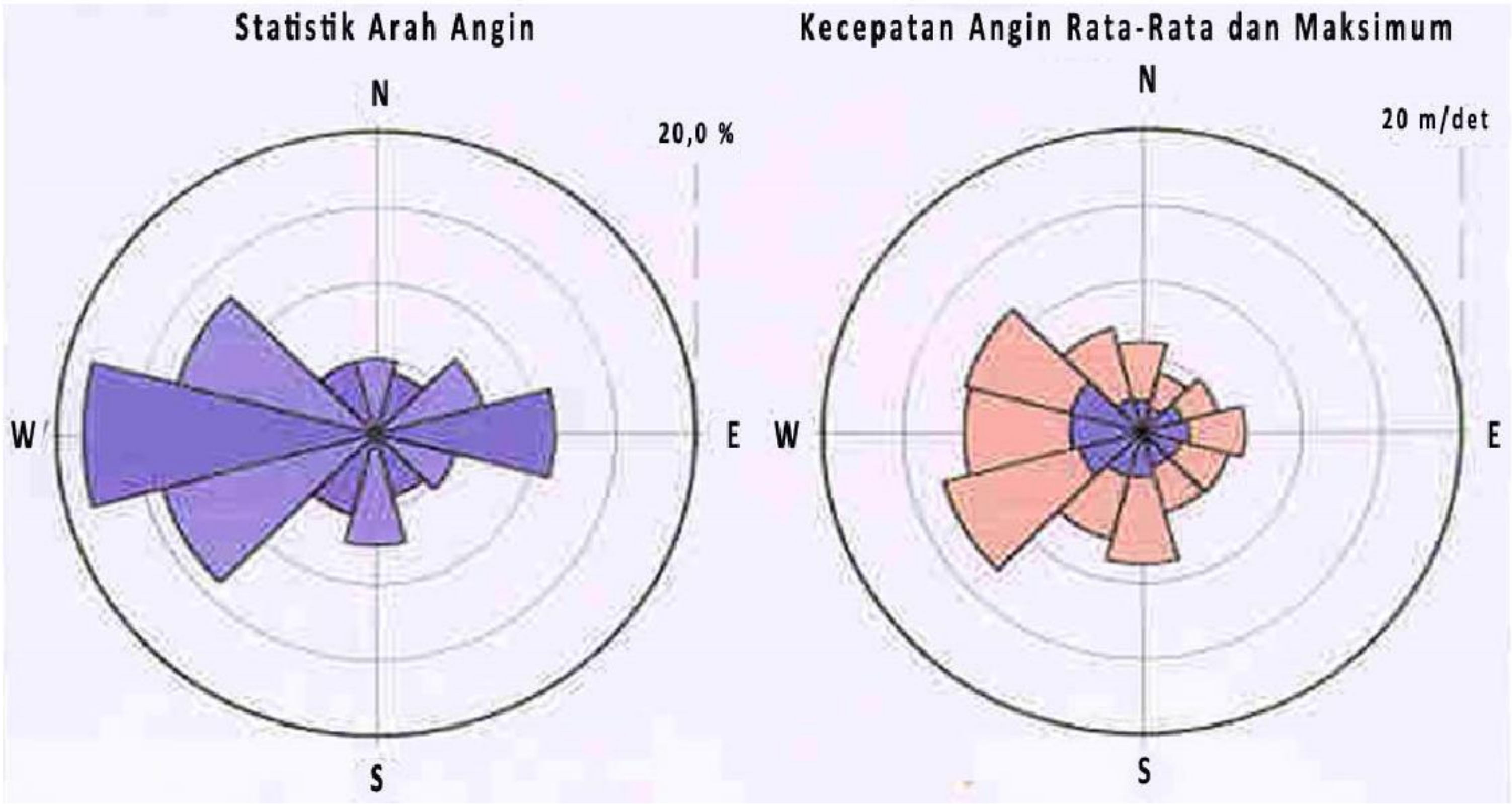
Lampiran E
(informatif)
Distribusi Weibull

Gambar E.1 - Distribusi Weibull untuk beberapa nilai k

(Sumber: WindGuard GmbH, Final Report on the one-year Wind Measurement Campaign, 2005)

Gambar E.2 - Kurva distribusi Weibull di NTT dengan nilai k untuk setiap bulan dalam 1 tahun (k rata-rata = 2,07 ditunjukkan oleh kurva merah)

Lampiran F
(informatif)
Distribusi arah angin (*wind rose*)

Tabel F.1 – Arah angin

Sektor	Sudut	Arah
S0	(345°) -15° sampai dengan 15°	Utara
S1	150° sampai dengan 450°	Utara timur laut
S2	450 sampai dengan 75°	Timur timur laut
S3	75° sampai dengan 105°	Timur
S4	105o sampai dengan 135°	Timur tenggara
S5	135° sampai dengan 165°	Selatan tenggara
S6	165° sampai dengan 195°	Selatan
S7	195° sampai dengan 225°	Selatan barat daya
S8	225° sampai dengan 255°	Barat barat daya
S9	255° sampai dengan 285°	Barat
S10	285° sampai dengan 315°	Barat barat laut
S11	315° sampai dengan 345° (-15°)	Utara barat laut

Dalam menentukan statistik arah angin dengan melihat rata-rata kecepatan angin setiap bulan sehingga dari Gambar F.1 ada 12 sektor arah angin dari rata-rata sektor arah angin setiap bulan. Pada Gambar F.1 warna biru merupakan kecepatan angin rata-rata tiap bulan dan warna merah merupakan sektor arah angin maksimum tiap bulan.

Gambar F.1 – Arah angin

Lampiran G
(informatif)
Distribusi frekuensi kecepatan angin dengan *bin* 1 m/s

Tabel G.1 – Distribusi frekuensi kecepatan angin dengan bin 1 m/s

V, m/s	fi (meas), %	f (Ray), %	f (Wei), %
0-1	1,11	3,64	6,85
1-2	19,32	10,15	12,63
2-3	20,74	14,60	14,57
3-4	13,27	16,38	14,34
4-5	7,72	15,68	12,84
5-6	8,52	13,25	10,71
6-7	8,15	10,06	8,44
7-8	6,54	6,93	6,34
8-9	4,94	4,35	4,57
9-10	2,78	2,50	3,16
10-11	2,28	1,32	2,11
11-12	2,10	0,64	1,36
12-13	0,99	0,29	0,85
13-14	0,74	0,12	0,52
14-15	0,43	0,05	0,31
15-16	0,19	0,02	0,18
16-17	0,12	0,01	0,10
17-18	0,06	0,00	0,05
18-19	0,00	0,00	0,03
19-20	0,00	0,00	0,01
20-21	0,00	0,00	0,01
21-22	0,00	0,00	0,00
22-23	0,00	0,00	0,00
23-24	0,00	0,00	0,00
24-25	0,00	0,00	0,00

(Sumber: Data distribusi frekuensi kecepatan angin Desa Bungaiya tahun 1995-LAPAN)

Bibliografi

[1] SNI IEC 61400-2: 2016, Turbin Angin - Bagian 2: Persyaratan rancangan turbin angin skala kecil (IEC 61400-2: 2016, IDT)
[2] SNI IEC 61400-12-1:2016, Turbin Angin – Bagian 12-1: Pengukuran kinerja daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin (IEC 61400 -12-1: 2005, IDT)
[3] Freris, LL. 1990, *Wind Energy Conversion Systems*: *Prentice Hall NY*
[4] LAPAN. 1995, Data distribusi frekuensi kecepatan angin Desa Bungaiya.
[5] WindGuard GmbH. 2005, *Final Report on the one-year Wind Measurement Campaign*
[6] Danida Environmental Support Programme. 2015, *Mapping Indonesia's Wind Resources*

Informasi pendukung terkait perumus standar

[1] Komtek/SubKomtek perumus SNI

Komite Teknis 27-03 Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan

[2] Susunan keanggotaan Komtek perumus SNI

Ketua : Ahmad Indra Siswantara

Wakil Ketua *): Martha Relitha S

Sekretaris : Faisal Rahadian

Anggota : Adjat Sudrajat
Tony Susandy
Oo Abdul Rosyid
Widya Adi Nugroho
Sri Rahayu
Yenny Sofaeti
Ade Adriansyah
Ika Monika
Ika Hartika Ismet
Indra Djodikusumo
Sahat Pakpahan
Mochamad Sjachdirin
Bambang Purwatmo
Soeripno Martosaputro
Pahlawan Sagala
Carolus Boromeus Rudationo
Asep Sopandi
Eddy Permadi
Yanda Prakasa
Kharisma Surya Gautama
Harry Indrawan
Dimas Kaharudin
Sentanu Hindrakusuma
Muhammad Nashar

[3] Konseptor rancangan SNI

Sahat Pakpahan

[4] Sekretariat pengelola Komtek perumus SNI

Direktorat Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan
Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi
Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral